

Área temática 2

2.45. PREDICCIÓN MORFODINÁMICA OPERACIONAL. UNA NUEVA ESTRATEGIA DE GESTIÓN DEL LITORAL

A.Sánchez-Arcilla¹, V. Gracia¹, M. García¹ y J.M. Solé¹

© 2012 Los autores.

Prohibida su reproducción en cualquier medio sin mencionar su fuente o su utilización con objetivos comerciales sin la autorización previa por parte de sus autores.

Los responsables de la presente publicación agradecen la desinteresada colaboración de los ponentes y de los asistentes al Congreso de Gestión Integrada de Áreas Litorales, GIAL 2012, celebrado en Cádiz (España) del 25 al 27 de enero de 2012.

Grupo de Investigación en Gestión Integrada de Áreas Litorales,
Universidad de Cádiz, España: www.gestioncostera.es

También en el blog del Congreso, en www.gial2012.com

Cualquier sugerencia u observación, rogamos la hagan llegar al Grupo a través de cualquiera de ambos canales telemáticos.

2.45. PREDICCIÓN MORFODINÁMICA OPERACIONAL. UNA NUEVA ESTRATEGIA DE GESTIÓN DEL LITORAL

A.Sánchez-Arcilla¹, V. Gracia¹, M. García¹ y J.M. Solé¹

¹Universitat Politècnica de Catalunya, Laboratori d'Enginyeria Marítima, c/ Jordi Girona 1-3, Campus Nord-UPC, Edif. D-1, 08034 Barcelona, Spain. agustin.arcilla@upc.edu

Palabras clave: Impacto de temporales, gestión, sistema operacionales, SWAN, XBEACH.

RESUMEN

Una parte muy importante de las playas de arena de España pueden ser consideradas como playas urbanas y por tanto se encuentran limitadas en su parte continental por todo tipo de infraestructuras (paseos marítimos, calles, comercios, carreteras, vías de tren, etc.). En la mayoría de ocasiones esta ocupación del dominio natural no ha tenido en cuenta su alta variabilidad y dinamismo por lo que resultan especialmente vulnerables al impacto de temporales. Conocer con antelación cual será la respuesta de un tramo de costa frente a unas determinadas condiciones hidrodinámicas es altamente interesante puesto que permitiría escoger de antemano la mejor estrategia de defensa minimizando en lo posible los impactos.

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de un sistema de predicción morfodinámico, PRE-MOS (*Pre - Morphodynamic Operational System*), como herramienta de alarma temprana y gestión de la costa. Para ello se pretende reproducir la respuesta morfodinámica de dos playas de la litoral noroccidental mediterráneo español frente al impacto del temporal de Diciembre de 2008, que arrasó esta parte de la costa causando graves daños en paseos marítimos y otras infraestructuras.

PREMOS se estructura en tres grandes módulos: (1) una unidad meteorológica representada por las predicciones de viento realizadas de forma rutinaria por el Servei Meteorològic de Catalunya mediante los modelos MM5 y WRF (Dudhia, 1993) para el mediterráneo noroccidental y que sirven como condición de partida a (2) la unidad de generación y propagación del oleaje, (SWAN, Booij et al. 1996) en donde se reproducen los procesos del oleaje que finalmente son utilizados en (3) un modelo de evolución morfodinámico (XBEACH, Roelvink et al. 2009) en donde se analiza la respuesta de la costa frente a estas acciones de oleaje. SWAN es un modelo de tercera generación de oleaje que ha sido previamente validado para distintos temporales para la costa mediterránea española (Alomar et al., 2009) mientras que el modelo XBEACH ha sido utilizado para evaluar los procesos de rebase y rotura en un tramo de costa del delta del Ebro (mediterráneo noroccidental) por García et al. (2011).

El artículo describirá en detalle los resultados obtenidos en dos playas de la costa Catalana, realizando un análisis crítico sobre las sensibilidades del sistema frente a condiciones de partida (batimetría y condiciones de oleaje) distintas con el fin de determinar la utilidad de este tipo de aproximaciones para la gestión de costas.

1. INTRODUCCION

Una parte muy importante de las playas de España pueden ser consideradas como playas urbanas y por tanto se encuentran limitadas en su parte continental por todo tipo de infraestructuras (paseos marítimos, edificios, carreteras, vías de tren, etc.). En muchas ocasiones esta ocupación del dominio natural no ha tenido en cuenta su alta variabilidad y dinamismo por lo que resultan especialmente vulnerables al impacto de temporales. Conocer con antelación cual será la respuesta de un tramo de costa frente a unas determinadas condiciones hidrodinámicas resulta altamente interesante puesto

que permitiría escoger de antemano la mejor estrategia de defensa minimizando en lo posible los impactos.

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de un sistema de predicción morfodinámico, PRE-MOS (Pre - Morphodynamic Operational System), como herramienta de alarma temprana y gestión de la costa. Para ello se ha reproducido la respuesta morfodinámica de tres playas del litoral catalán, frente al impacto de un gran temporal que tuvo lugar en Diciembre de 2008 y que afectó a una parte importante de las infraestructuras del litoral causando un total de 3 muertos. En el artículo se describen los pasos seguidos en la implementación del sistema de predicción y se evalúa la sensibilidad del sistema frente a condiciones de oleaje distintas, con el fin de determinar el rango de validez de este tipo de aproximaciones para la gestión de costas.

2. AREA DE ESTUDIO

La costa catalana tiene una longitud aproximada de unos 700 km de los cuales alrededor de 250 km son playas de arena. En su mayoría (exceptuando las playas del delta del Ebro) se trata de playas urbanas o semi-urbanas limitadas en la parte continental por una gran variedad de infraestructuras de elevado interés económico. En concreto, las playas analizadas han sido (ver figura 1) las de La Porquerola en la provincia de Tarragona, Pont del Petroli en la provincia de Barcelona y la playa de S'Abanell en la provincia de Girona.

La playa de la Porquerola (T.M. de Mont-Roig del Camp), con un sedimento de arena fina de unas 170 μm , se localiza dentro de un tramo de costa longitudinalmente uniforme de unos 6.5 km de longitud, abierto al oleaje. La parte posterior de la playa se sitúa entre las cotas +2.3 m, en la zona de la desembocadura de la riera de la Porquerola y la +3.1 m en el sector septentrional. Un aspecto distintivo de la playa es la existencia de una pradera de Posidónea bien desarrolla a partir de una profundidad de unos 3 m (figura 1) justo frente a la desembocadura de la riera.

La playa del Pont del Petroli (T.M. de Badalona) constituida por un sedimento más grueso de unas 350 μm , es un claro ejemplo de playa urbana en vías de recuperación en la que se está construyendo un paseo peatonal (entre las cotas +5 m y +6 m) tras el cual se sitúa una línea de viviendas a una distancia media de la orilla de entre 50 y 80 m.

La playa de S'Abanell (en el T.M. de Blanes) es la playa con el sedimento más grueso, de 700 μm , tiene una longitud de unos 2,5 km y un ancho medio de 22 m. Los tramos central y norte se encuentran totalmente integrados en el casco urbano y vienen limitados por un paseo marítimo y red de calles que sitúan la parte el trasdós entre las cotas +3.8 y +4.2 m. El tramo sur, hasta la desembocadura del río Tordera, mucho menos urbanizado, presenta una zona de campings con acceso directo a la playa a una cota ligeramente más baja, entre la +1.9 y +2.9 m.

Figura 1. Localización de las playas de estudio e información de boyas de oleaje de la red XIOM.**El temporal de diciembre de 2008**

Durante los días 26 a 28 de Diciembre de 2008 un centro de altas presiones se instala al norte de Europa y provoca el estancamiento de una débil borrasca justo frente a las costas de Catalunya. El resultado de esta situación meteorológica fue la generación de un campo de vientos del Este muy fuerte (con valores medios superiores a los 50 km/h) que actuó durante unos 2 días generando un temporal de mar típicamente de Levante.

En la figura 2 se presentan los valores de altura de ola H_s , periodo y dirección registrados por las boyas de oleaje (red de medidas XIOM) próximas a las playas de estudio. Las mayores alturas se situaron en el sector central (boya Llobregat) y Norte (boya Blanes) con valores de hasta 4.65 m de H_s y periodos de pico, T_p , de 14.3 s mientras que al Sur (boya de Cap Tortosa) el temporal presentaba una menor intensidad, con valores de H_s y T_p de 3.6 m y 13.3 s respectivamente. En la tabla 1 se muestra un resumen de los valores más representativos.

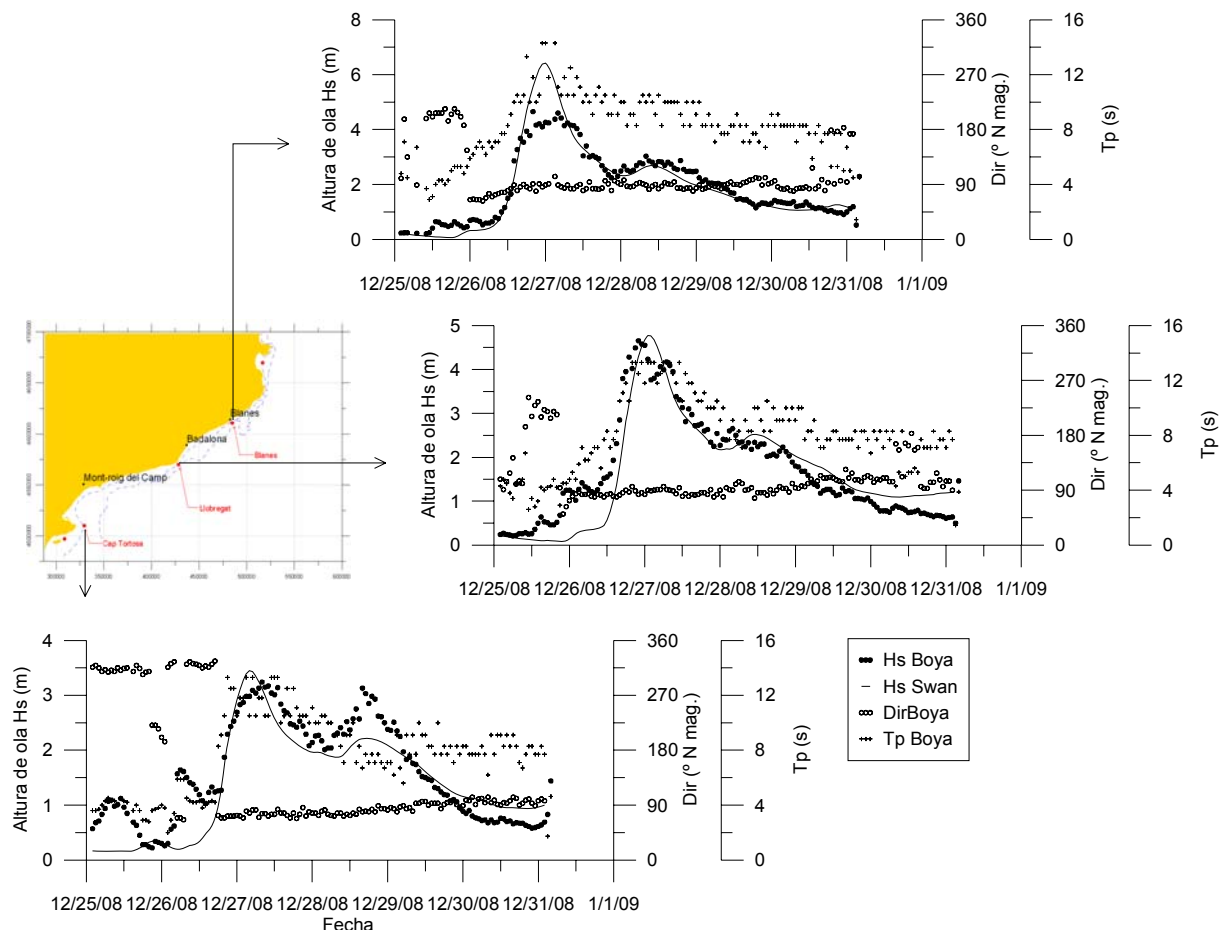
Tabla 1. Características principales del temporal de diciembre de 2008 registrados por la red de medidas oceanográficas XIOM.

| | Hs máx. (m) | Tp máx. (s) | Tr (años) | Dirección (N. mag) | Duración (días) |
|-------------|----------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| Blanes | 4.65 | 14.3 | 5 | 77 | 65 |
| Llobregat | 4.65 | 13.3 | 10 | 88 | 55 |
| Cap Tortosa | 3.24 | 13.3 | 1 | 87 | 55 |

El impacto del temporal produjo graves destrozos en numerosos municipios de la costa central y norte, con la rotura de paseos marítimos y caminos de acceso (Blanes, Escala o Cadaqués entre otras

localidades), el rebase de obras de abrigo de puertos (Blanes y Llançà), la inundación de parte del casco urbano (Blanes, Tossa de Mar) o la rotura de mobiliario y servicios, causando además un total de tres personas muertas lo que acabó por generar un estado de alarma que llevó en muchos casos al cierre de accesos a las playas. El coste aproximado de los daños tan solo en los municipios del sector Norte superó los 11 millones de euros (Torres, 2009).

Figura 2. Características del oleaje del temporal de Diciembre de 2008 registradas por la red de medidas oceanográficas XIOM y predicción del modelo SWAN.



3. METODOLOGIA

La respuesta morfodinámica de las playas de La Porquerola, Pont del Petroli y S'Abanell al temporal de Diciembre de 2008 ha sido obtenida de dos formas distintas: (i) alimentando directamente el modelo XBEACH con la información de oleaje y nivel medio registrado por las boyas de la red XIOM y estaciones meteorológicas y (ii) con un planteamiento puramente pre-operacional, en el que para cada playa se realiza un pase del sistema PRE-MOS. Los resultados obtenidos en uno y otro caso han sido comparados de forma visual con la extensa información gráfica existente dada la imposibilidad de obtener las características morfológicas antes y después del temporal.

PRE-MOS (figura 3) se estructura en cuatro grandes módulos: (i) una unidad meteorológica que proporciona las predicciones de viento realizadas de forma rutinaria y que sirven como condición de partida a una (ii) unidad de generación y propagación del oleaje en donde se reproducen los procesos del oleaje que a su vez alimentan a (iii) un modelo de evolución morfodinámico en donde se simula la respuesta de la costa frente a estas acciones de oleaje. Finalmente, los resultados

obtenidos son analizados de forma integrada en (iv) un módulo de integración en el que se caracteriza la costa a partir de una serie de indicadores (agregados o simples).

Las fuentes meteorológicas utilizadas en el modelo PRE-MOS pueden ser de muy distinto origen (modelos MM5, MASS o WRF gestionados por el *Servei Meteorològic de Catalunya*) si bien en este caso se optó por las predicciones realizadas por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (Ecmwf) para el sector NW Mediterráneo español por ser las que mejor cubrían el periodo sujeto a análisis.

Conocidas las condiciones meteorológicas, PRE-MOS determina el campo de oleaje en el dominio mediante el modelo SWAN (Booj et al. 1996), un modelo de tercera generación de oleaje que incluye los procesos hidrodinámicos propios de zonas costeras poco profundas, a diferencia del modelo WAM más orientado a escalas oceánicas. Dentro del módulo hidrodinámico se incluyen las variaciones del nivel medio del mar; en este caso las posibilidades son múltiples pudiendo utilizar las predicciones realizadas por el ente público de *Puertos del Estado* para los puertos de Barcelona y Tarragona o bien realizar estimas más locales a partir de las predicciones de viento. En el caso de las playas de estudio el nivel medio ha sido evaluado de forma analítica a partir de las condiciones meteorológicas (presión atmosférica e intensidad del viento) registradas por estaciones próximas a las playas.

Los procesos morfológicos son evaluados con XBEACH (Roelvink et al. 2009), un modelo 2DH de propagación de oleaje, ondas largas, corrientes y transporte de sedimento asociado, específicamente desarrollado para playas abiertas, playas con dunas y playas barrera en condiciones de alta energía.

Todos estos modelos ofrecen una descripción muy detallada (tanto en el tiempo como en el espacio) de los distintos procesos que analizan, sin embargo, su aplicación para la gestión de la costa no siempre resulta fácil. Por ello se realiza un análisis, tanto de forma integrada como individual, de aquellos parámetros que pueden resultar de interés. En la tabla 2 se muestran los parámetros más comúnmente utilizados en el módulo de integración de indicadores.

Tabla 2. Parámetros analizados en el módulo integración de indicadores de PRE-MOS.

| | | | |
|---------------|-----------------------|----------------------------------|---|
| Hidrodinámica | Corrientes | Longitudinal | Intensidad |
| | | Transversal | Intensidad |
| | | Patrón (x,y) | Dimensiones |
| | Oleaje | H_b | Magnitudes, distancia a la costa y tipo |
| | | T_p | |
| | | θ_b | |
| | Nivel del mar | Remonte | Cota y alcance |
| | | Inundación | Caudales |
| Morfología | Erosión / Acumulación | Posición de la línea de orilla | |
| | | Cambios en playa emergida | |
| | | Cambios en playa sumergida | |
| | | Magnitudes (absolutas/relativas) | |

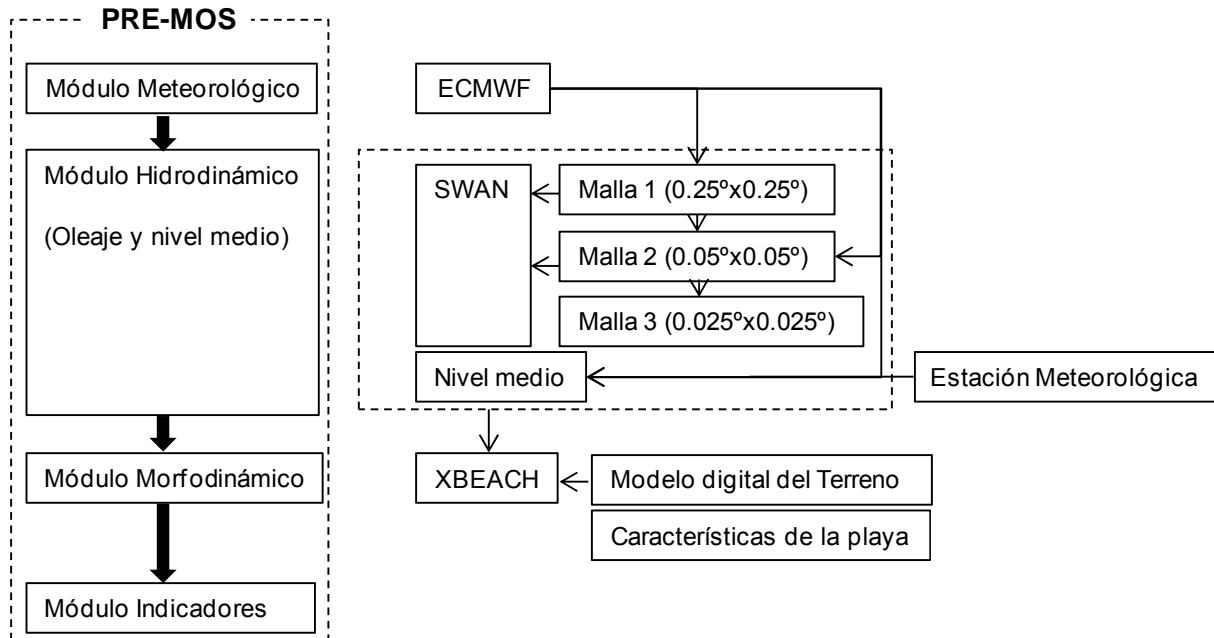
Validación de los modelos

La estructura secuencial de PRE-MOS, en la que un modelo sirve como forzamiento de otro en una única dirección, permite un tratamiento totalmente independiente. Con respecto al módulo meteorológico, las predicciones suministradas por el Ecmwf están siendo ampliamente utilizadas por la comunidad científica para describir de forma detallada las condiciones meteorológicas en el sector mediterráneo noroccidental (Cavalleri y Bertotti, 2003 y 2004, Bolaños et al. 2007, Rutti et al. 2008 entre otros) por lo que en este trabajo son consideradas como datos de partida en el sistema.

Alomar et al. (2009) y Solé (2011) entre otros, realizan un estudio de sensibilidad del modelo SWAN bajo distintos patrones climáticos y configuraciones para el mar catalán y concluyen que existe

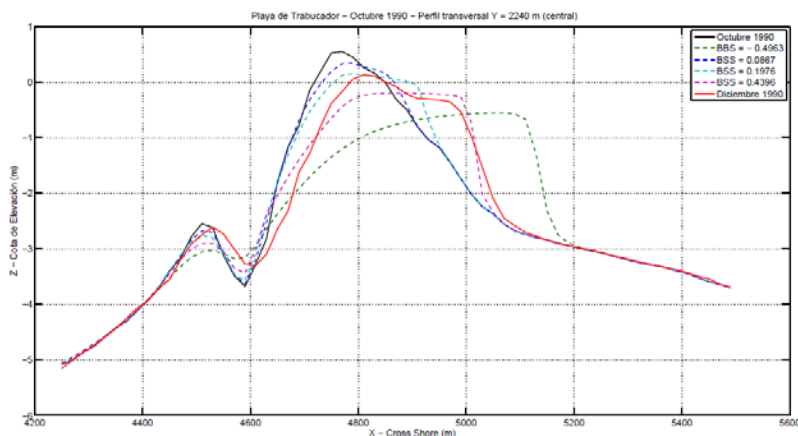
una fuerte dependencia entre los parámetros intrínsecos del modelo y las características meteorológicas de partida de forma que no existe a priori un esquema único de calibración. Por estos motivos, en este trabajo se ha optado por utilizar los parámetros por defecto del modelo.

Figura 3. Diagrama de flujo del sistema PRE-MOS (izq.) y modelos y fuentes de información asociados (dcha.).



El modelo XBEACH ha sido validado y calibrado por García et al. (2011) para la playa del Trabucador, una playa barrera de aproximadamente 4 km de longitud situada en el delta del Ebro. En la figura 4 se muestra a modo de ejemplo los resultados obtenidos por el modelo para distintas configuraciones y el índice de *Brier Skill Score* (BSS) siendo el mejor valor obtenido de 0.44 lo que de acuerdo con van Rijn et al.(2003) se corresponde con una reproducción del modelo que puede ser considerada como razonable. Nótese que el BSS es calculado de forma integrada para el dominio computacional (la totalidad de la barra) en la zona de mayor movilidad (entre las isobatas -3.5 m del lado mar y -3 m del lado tierra).

Figura 4. Calibración del modelo XBEACH en la barra del Trabucador (adaptada de García et al. 2011).



Implementación del sistema PRE-MOS

PRE-MOS utiliza un esquema de trabajo distinto según el módulo considerado. El módulo hidrodinámico (modelo SWAN) trabaja de forma anidada en 2 mallas esféricas regulares, una gruesa de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y otra más fina de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (figuras 2 y 5), de forma que las condiciones obtenidas en la malla gruesa proporcionan junto con el campo de vientos inicialmente suministrado por el Ecmwf las condiciones de partida de la malla fina. Concatenada a esta malla fina el modelo XBEACH trabaja con una serie de mallas locales representativas de cada playa (en la tabla 3 se presentan sus características computacionales principales) obtenidas a partir de la información disponible en el *Institut Cartogràfic de Catalunya* y que si bien deben ser consideradas como representativas de cada una de las zonas no están actualizadas a la situación previa al temporal.

El sistema de coordenadas utilizado en XBEACH es curvilíneo lo que permite adaptarse mejor a las características del terreno optimizando el relieve existente con el menor número posible de nodos. La formulación de transporte utilizada en el modelo se corresponde con la de van Rijn (2007) y en el caso de la playa de S'Abanell se ha realizado un test de sensibilidad adicional con la formulación de Soulsby (1997).

Figura 5. Anidamiento de mallas del sistema PRE-MOS.

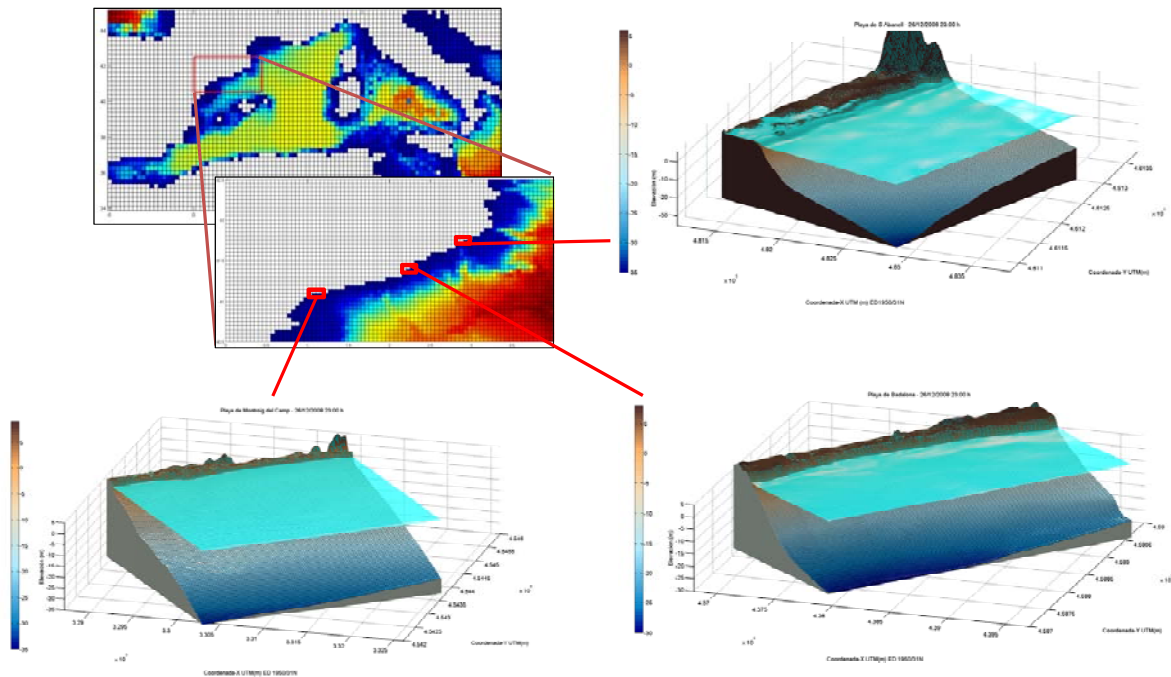


Tabla 3. Características principales del dominio computacional utilizado en XBEACH.

| | Longitud del dominio (m) | ancho medio dominio (m) | profundidad máxima (m) | cota máxima (m) | nx | ny | promedio transversal (m) | promedio longitudinal (m) | nº nodos |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-----|-----|--------------------------|---------------------------|----------|
| MontRoig del Camp | 2886 | 2660 | -33.36 | 9.27 | 115 | 94 | 23.13 | 30.70 | 10810 |
| Badalona | 2947 | 1443 | -29 | 7.614 | 132 | 104 | 10.93 | 28.34 | 13728 |
| Blanes | 2166 | 1639 | -33.88 | 45.936 | 167 | 117 | 9.81 | 18.51 | 19539 |

RESULTADOS

En la figura 2 se presentan las predicciones de altura de ola obtenidas por el modelo SWAN para el evento de diciembre de 2008. Como puede apreciarse el modelo predice el patrón general de comportamiento, con una estructura en todas las zonas muy similar. Los resultados obtenidos muestran la capacidad de reproducir un crecimiento muy rápido de la altura de ola debido a la intensidad de los vientos actuantes y un decaimiento progresivo y repunte (de mayor o menor intensidad) unas 24 horas más tarde.

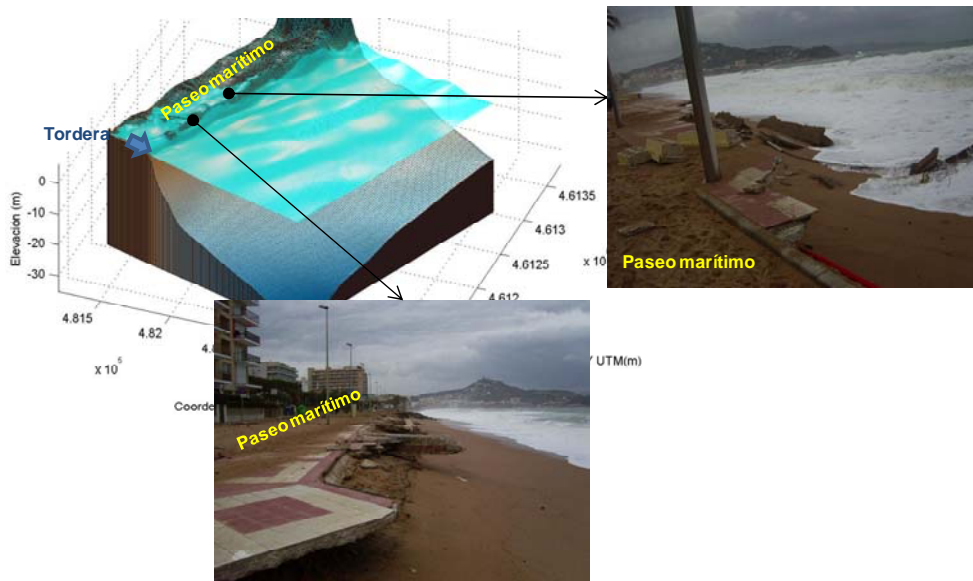
En la tabla 4 se muestran los errores medios cuadráticos para la totalidad del periodo y considerando sólo el evento más energético (altura de ola registrada por la boya superior a 2 m) así como las diferencias máximas registradas. Como puede apreciarse el pico del temporal es predicho con un error de unos 0.45 m para las boyas de Cap Tortosa y Llobregat mientras que en la boya de Blanes se produce claramente una sobre predicción con una diferencia de unos 2 m. Si las discrepancias se analizan en términos de error relativo medio absoluto, RMAE, se obtienen valores de 0.08 y 0.1 para la boya de Cap Tortosa y Llobregat lo que según van Rijn et al. (2003) se corresponde con un buen ajuste. En el caso de la boya de Blanes el RMAE ha sido de 0.15 y se describe como una predicción razonable. Los errores asociados al periodo y dirección del oleaje se sitúan en torno a 1s y 7º respectivamente, a excepción nuevamente de Blanes dónde los valores se doblan.

Tabla 4. Error medio cuadrático (RMSE) y diferencias máximas obtenidas por el modelo SWAN en las distintas zonas (los valores con * representan el pico del temporal con Hs>2 m).

| Batimetría | Resolución | Boya | Hs (m) | | | | Tp (s) | | | | Dirección (º) | | | |
|------------|---------------|-------------|--------|-------|-----------|------------|--------|-------|-----------|------------|---------------|-------|-----------|------------|
| | | | RMSE | RMSE* | Dif. Máx. | Dif. Máx.* | RMSE | RMSE* | Dif. Máx. | Dif. Máx.* | RMSE | RMSE* | Dif. Máx. | Dif. Máx.* |
| GEBCO | 0.05º x 0.05º | Blanes | 0.52 | 1.02 | 2.29 | 2.29 | 1.4 | 2.3 | 4.5 | 4.2 | 44 | 14 | 147 | 16 |
| | | Llobregat | 0.50 | 0.46 | 1.46 | 1.46 | 1.4 | 1.1 | 3.9 | 2.6 | 47 | 7 | 172 | 18 |
| | | Cap Tortosa | 0.83 | 0.43 | 1.44 | 0.92 | 1.7 | 1.8 | 4.6 | 3.7 | 50 | 6 | 141 | 15 |

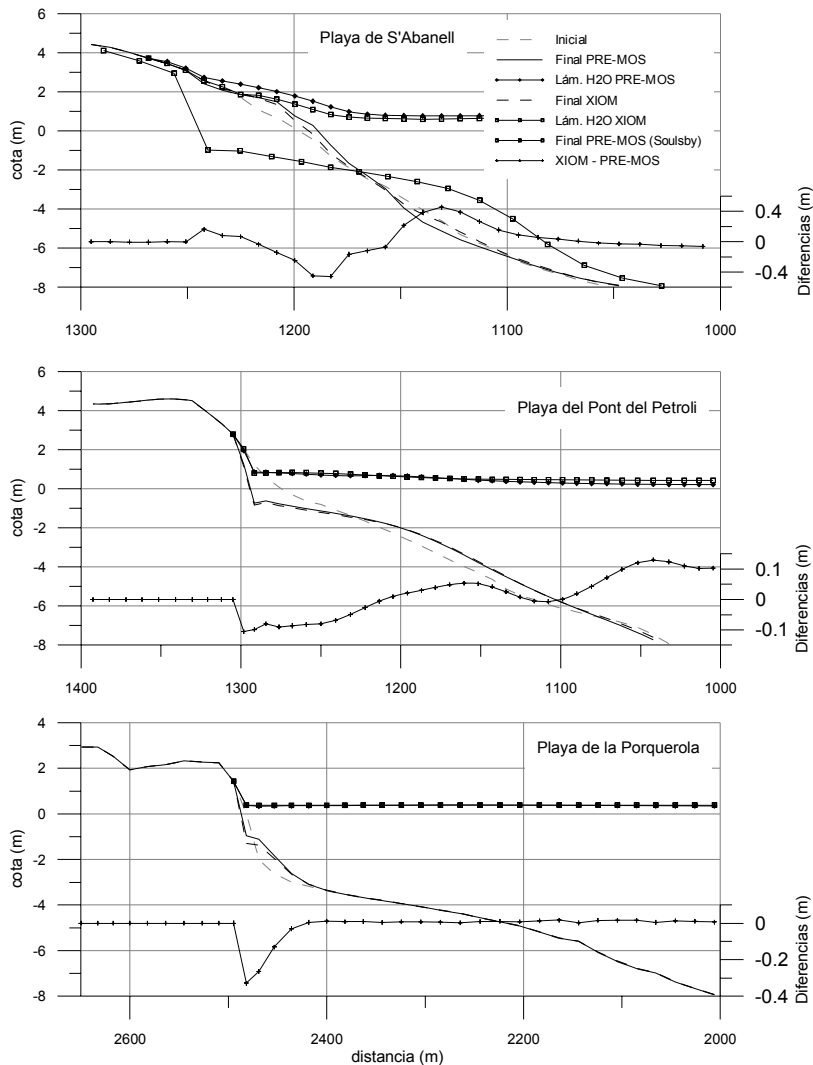
En la figura 6 se presentan el impacto del pico del temporal reproducido por PRE-MOS en la playa de S'Abanell. Como puede verse el sistema reproduce una inundación muy severa en la zona de la desembocadura del río Tordera y zona central de la playa con la consiguiente afectación de los campings de la zona y paseo marítimo, tal y como se refleja en las fotografías de la figura. El impacto del oleaje de acuerdo con PRE-MOS fue menor en el tramo más al norte de la playa. Sin embargo el sistema no es capaz de reproducir las acumulaciones de arena que tuvieron lugar sobre una parte muy importante del paseo. Los resultados obtenidos para la playa de el Pont del Petroli no mostraron ningún episodio de rebase relevante si bien el sistema arroja un retroceso de la costa muy significativo de unos 20 m, aspecto que fue puesto de manifiesto por los periódicos de la zona (Carvajal, 2008). Finalmente, la playa de la Porquerola es la que sufrió un menor impacto con una erosión de la parte emergida y acumulación de arena en la zona sumergida (figura 7).

Figura 6. Simulación 3D de la playa de S'Abanell en el pico del temporal.



En la figura 7 se muestran los perfiles de playa resultantes según se alimente el sistema con los datos de las boyas de oleaje (red de medidas XIOM) o bien con un planteamiento puramente operacional (PRE-MOS). Como cabía esperar, el perfil de S'Abanell es el que presenta las mayores diferencias, en torno a 0.4 m, reflejo de una sobrepredicción del oleaje por parte del modelo SWAN. El nivel del mar en zona de rompientes, así como el remonte son superiores en el caso de PRE-MOS. Esto se traduce en una mayor erosión local en la cimentación del paseo marítimo situado paralelo a la línea de costa, tal como se observa en las fotografías de la figura 6.

En la playa del Pont del Petroli las diferencias de los perfiles según sean calculados a partir de los datos de la XIOM o bien de forma operacional (PRE-MOS) son muy similares y reflejan el buen ajuste obtenido en las condiciones hidrodinámicas. La playa de la Porquerola presenta una tendencia similar si bien puntualmente las diferencias llegan a alcanzar los 0.36 m.

Figura 7. Perfiles inicial y final para las distintas playas y casos analizados y lámina de agua asociada

La elección de la ecuación del transporte dentro del modelo XBEACH resulta determinante en términos de la respuesta morfológica del perfil. En el caso de utilizar la ecuación de Soulsby (1997) el perfil responde erosionando la zona próxima a la orilla (entre la cota +2 y isobata -2 m) y acumulando el material aguas adentro. Por el contrario, si se utiliza la ecuación de van Rijn (2007), junto con un modelo de oleaje que incluye la asimetría de la ola, el comportamiento es totalmente distinto observándose una erosión en la parte sumergida y acumulación en la parte emergida de la playa.

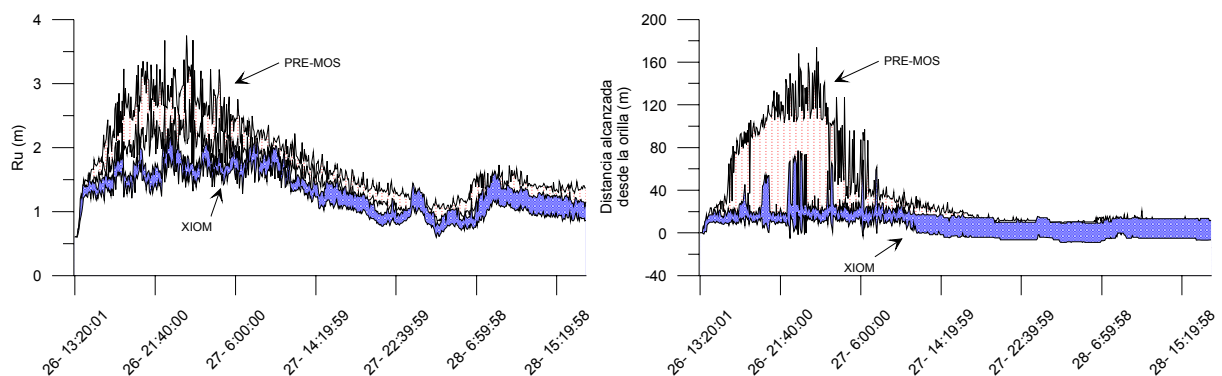
DISCUSIÓN

Los sistemas de predicción operacional están sujetos a una serie de incertidumbres y errores estrechamente relacionados con la naturaleza de los modelos que los componen y la forma en que se comunican entre ellos (Baart et al. 2011). La elección de un buen modelo meteorológico sin duda repercute en el resultado final (Cateura et al. 2005; Bolaños et al. 2007); sin embargo, el procedimiento utilizado en PRE-MOS hace que el primero de la cadena en cuanto a la introducción de errores sea desde un punto de vista formal el módulo de generación y propagación del oleaje (SWAN).

En líneas generales las predicciones obtenidas por el modelo SWAN son buenas, si bien en el caso de Blanes se produce una excesiva sobrepredicción del evento. Las causas que explican esta gran

diferencia son múltiples, desde un escenario meteorológico mal representado localmente hasta un anidamiento de mallas inadecuado. Las características meteorológicas de Diciembre de 2008 (vientos continuados de Levante) junto con la orografía costera de Blanes representan una de las situaciones meteorológicas más simples (a diferencia de otros sectores en los que puede coexistir un viento de gran intensidad de tierra junto con otro marítimo también intenso) por lo que en este caso no puede ser considerada como una fuente de errores relevante. Por otro lado, la introducción de una malla más fina en el módulo hidrodinámico ha resultado en una sub-predicción generalizada de la altura de ola. Este comportamiento de SWAN ha sido observado por Alomar et al. (2010) para distintos escenarios climáticos del mar catalán. El uso de mallas anidadas más finas debe ir acompañado por un campo de vientos local, de lo contrario el esquema implícito utilizado por SWAN tenderá a suavizar las condiciones de oleaje.

Figura 8. Máximos y mínimos del remonte (sup.) y distancia que alcanza el remonte desde la orilla (inf.) para la totalidad de la playa de S'abanell.



Con respecto al modelo XBEACH, los resultados obtenidos en este trabajo muestran, como cabía esperar, una respuesta morfológica distinta conforme varían las condiciones de oleaje distintas. Sin embargo, en el caso más extremo (playa de S'Abanell) en el que las condiciones de oleaje tienen una diferencia máxima de 2 m en el pico del temporal, las variaciones en la batimetría resultantes no superan los 0.45 m. La influencia de las condiciones hidrodinámicas es más visible en los términos de interacción ola-playa, como puede ser el nivel del mar o remonte (figura 7). Un aspecto determinante en la respuesta morfológica del modelo es la elección de la ecuación de transporte adecuada. En el caso de la playa de S'Abanell (playa reflejante) el uso de la ecuación de Soulsby (1997) produce un comportamiento de la playa inesperado, con la generación de un gran escarpe entorno a la línea de orilla y una acumulación de sedimento en la parte más emergida. Sin embargo, la respuesta morfológica fue la de un suavizado del perfil y acumulación de arena en la parte más emergida (figura 6). En condiciones de playa reflejante, el modelo parece indicar una sobre-predicción de las corrientes de resaca lo que resulta en un transporte de sedimento excesivo en dirección de mar abierto. Esta necesidad de calibración del módulo morfodinámico a nivel local ya ha sido puesta de manifiesto en publicaciones recientes (Ciavola et al. 2011a, 2011b).

Desde el punto de vista de la gestión de la playa, la elección de los indicadores que describan el comportamiento hidro-morfodinámico es de vital importancia. Existe una gran cantidad de trabajos en los que se propone un tipo u otro de metodología (Mendoza y Jiménez, 2009, Valdemoro et al. 2003, Davidson et al. 2003). En la mayoría de casos, las ecuaciones de cálculo utilizadas simplifican excesivamente el proceso (valores morfológicos irreales) o bien son muy regionales (condiciones de aguas profundas). Un ejemplo de la dificultad de presentar un indicador único para una playa puede verse en la figura 8, en la que se muestran los valores máximos y mínimos del remonte del oleaje y la distancia que alcanza la lámina de agua desde la orilla para la totalidad de la playa de S'abanell.

CONCLUSIONES

El sistema PRE-MOS ha sido capaz de reproducir el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico en las playas del litoral catalán para el temporal de Diciembre de 2008.

La elección de las escalas de anidamiento y condiciones de contorno en los distintos modelos ha resultado fundamental puesto que condicionan el resultado final. En el caso del modelo SWAN, un refinamiento de la malla no ha comportado una mejora de los resultados. Los resultados obtenidos por XBEACH muestran una gran dependencia con la estrategia utilizada en la inicialización del modelo.

El uso de indicadores agregados debe ir acompañado por el rango de variabilidad que reflejan las condiciones de la playa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto europeo FIELD_AC (contrato núm. 242284) y se ha desarrollado dentro del Master Internacional de Gestión de Zonas Costera y Estuáricas (Apoyado por el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino). Los autores agradecen la información proporcionada por el *Servei Meteorològic de Catalunya* y el *Institut Cartogràfic de Catalunya*.

REFERENCIAS

- Alomar M., Bolaños R., Sánchez-Arcilla A., Sairouni A. y Ocampo-Torres F.J. 2009. Uncertainties in wave modeling for fetch-limited growth conditions. A: 33rd IAHR Congress. "Water engineering for a sustainable environment : 33rd IAHR Congress, Hyatt Regency Vancouver". 2009, p. 2846-2853.
- Bolaños-Sanchez R., Sánchez-Arcilla A. and Cateura J., 2007. Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine System*, 65 (2007), pp. 336–353.
- Booij, N., Holthuijsen, L.H. and R.C. Ris, 1996, The SWAN wave model for shallow water, *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng.*, Orlando, USA, Vol. 1, pp. 668-676.
- Carvajal C. "Badalona pateix també els efectes del temporal de llevant" [en línea]. El TotBadalona. <http://www.eltotdigital.com/2008/> [consulta: 1 de noviembre de 2011].
- Cateura, J., Sanchez-Arcilla, A., Bolaños, R., 2005. High resolution wind modelling. Mediterranean extremes. 12th International Congress of the international maritime association of the Mediterranean (IMAM 2005). Lisbon, Portugal, 26–30 September.
- Cavaleri, L. and Bertotti, L.: Accuracy of the modeled wind and wave fields in enclosed seas, *Tellus*, 56a, 167–175, 2004. Cavaleri, L. and Bertotti, L.: The characteristics of wind and wave fields modelled with different resolutions, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 1647–1662, 2003.
- Ciavola, P., Ferreira, O., Haerens, P., Van Koningsveld, M., Armaroli, C., Lequeux, Q., 2011a. Storm impacts along European coastlines. Part 1: The joint effort of the MICORE and ConHaz Projects. *Environmental Science and Policy*, 14 (7), pg. 912-923
- Ciavola, P., Ferreira, O., Haerens, P., Van Koningsveld, M., Armaroli, C., 2011b. Storm impacts along European coastlines. Part 2: lessons learned from the MICORE project. *Environmental Science and Policy*, 14 (7), pg. 924-933.
- Davidson, M.A., Van Koningsveld, M. de Kruif, A. Rawson, J. Holman, R. Lamberti, A., Medina, R. Kroon, A. and Aarninkhof, S. 2007. The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering*. Vol 54, Nos. 6-7
- Dudhia, J., 1993: "A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front". *Mon. Wea. Rev.*, vol. 121, p. 1493-1513.

- García M., Solé J.M., Gracia V., Alomar M., Tolosana R.1, Fernández J., Pallarès E., Jiménez J. and Sánchez-Arcilla A. Modelling barrier beaches under storms with XBEACH: The case of the Trabucador bar. DeltaNet International Conference. St. Carles de la Ràpita (Spain). Book of abstracts.
- Mendoza E.T. y Jiménez, J.A. 2009 Regional geomorphic vulnerability analysis to storms for Catalan beaches. Proceedings of the Institution of Civil Engineering: Maritime Engineering, ICE. 162, 3, 127 – 135.
- Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R. and Lescinski J. 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, Volume 56, Issues 11-12, November-December 2009.
- Ruti P.M., Marullo S., D'Ortensio F. y Tremant M. 2008. Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the Mediterranean basin: analyses QuikSCAT and buoy data. *J. Mar. Science*, 70, pp. 33–48.
- Sole J. M. 2011. Evaluation of SWAN model for modeling wind-generated waves in the Catalan Coast. Proyecto Final de Máster Internacional de Gestión de Zonas Costeras y Estuáricas. Universidad Politécnica de Cataluña, 35pp y anejos.
- Soulsby, R. L. (1997), Dynamics of Marine Sands, Thomas Telford, London.
- Torres, Anna. "Temporal Marítim de Llevant a la Costa Brava" [en línea]. *Territori, Observatori de Projectes i debats territorials de Catalunya*. 31 diciembre 2009. <http://territori.scot.cat/index.php> [consulta: 14 noviembre de 2011].
- Valdemoro, H.I., Jiménez, J.A., Cáceres, A. and Gracia, V. 2003. Utilización de indicadores en gestión de costas. Aplicación a la evaluación de riesgos de infraestructuras en playas urbanas. VII Jornadas Españolas de Costas y Puertos. Libro de resúmenes, p 504-506.
- van Rijn, L.: 2007, 'Unified view of sediment transport by current and waves, part I, II, III and IV'. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(6,7), 649–689 (part I & part II), 761–793 (part III & part IV).
- van Rijn, L. C., D. J. R. Walstra, B. Grasmeijer, J. Sutherland, S. Pan, and J. P. Sierra: 2003, 'The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models'. *Coastal Engineering* 47(3), 295–327